Background Paper BP-291E

FUSION: POWER FOR THE FUTURE?

Alan Nixon
Science and Technology Division

April 1992

Library of Parliament
Bibliothèque du Parlement

Research Branch

93-01874/

The Research Branch of the Library of Parliament works exclusively for Parliament, conducting research and providing information for Committees and Members of the Senate and the House of Commons. This service is extended without partisan bias in such forms as Reports, Background Papers and Issue Reviews. Research Officers in the Branch are also available for personal consultation in their respective fields of expertise.

©Minister of Supply and Services Canada 1992
Available in Canada through
your local bookseller
or by mail from
Canada Communication Group -- Publishing
Ottawa, Canada K1A OS9

Catalogue No. YM32-2/291E
ISBN 0-660-14582-0

CE DOCUMENT EST AUSSI PUBLIÉ EN FRANÇAIS

CANADA

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHEQUE DU PARLEMENT

FUSION: POWER FOR THE FUTURE?

INTRODUCTION

Fusion power is the holy grail of the scientific world. Scientists have already been on the quest for about four decades and the end is not yet in sight. Fusion, which was first explained by Hans Bethe in the late 1930s, is the process which lights the sun and stars. Controlled fusion is enormously difficult to achieve on earth, however, and, although a great deal of progress has been made, it is believed it will take at least another three decades before fusion power can become an economically viable proposition.

Two recent events have brought fusion back before the public eye. One was the announcement of "cold fusion," the claim that fusion had been achieved, albeit in a very limited way, in a simple electrolytic cell. Had the claim been true, and it now appears certain that it was not, it would have revolutionized fusion science. The other event was the announcement in November 1991 that the Joint European Torus (JET) had produced a two-megawatt pulse of power lasting almost two seconds. This was the first time a significant amount of power had been produced in a fusion reactor.

Why is fusion power so attractive that research programs have been supported for so long, even though the reward, if it comes at all, is still far in the future? Compared to conventional nuclear power, fusion is very safe; fusion is also environmentally benign, since it emits no acid rain-forming or greenhouse gases. The fuel is relatively cheap and virtually unlimited.

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHEQUE DU PARLEMENT

The fuel is a form of hydrogen, which is the major component of the universe and is present on earth in vast quantities in the oceans as water. The combination of high temperature and pressure, under which fusion occurs in stars, cannot be duplicated on earth and finding a practical way of tapping, in a controlled fashion, the energy in the hydrogen atom is a formidable challenge.

BASIC PRINCIPLES

Nuclear energy, both fusion and fission, depends on the energy that binds atomic nuclei together. The mass of the atomic nucleus is slightly less than the total mass of the separate protons and neutrons that form it. This phenomenon is known as the "mass defect." The relationship between mass and energy is given by Einstein's famous equation: $E=mc^2$ where E is energy, m is mass and c stands for the speed of light. Because the speed of light is so great, 300 million metres per second, even a small amount of mass is equivalent to an enormous quantity of energy. One gram of matter converted completely to energy would produce 90 million million joules, equivalent to the energy produced by burning 15,000 barrels of oil. The mass defect reaches its maximum value at iron, which is about midway in the periodic table of elements. In principle, atomic nuclei lighter than iron can release energy by combining or fusing to form heavier nuclei, while nuclei heavier than iron can release energy by splitting apart in the process known as fission. Fission is the process that provides the source of energy in conventional nuclear power and in the atomic bomb.

Although, theoretically, all the elements lighter than iron can fuse to release energy, only a few of the lightest elements, hydrogen, helium, and lithium, could be made to do so under conditions that could conceivably be produced on earth. For fusion to occur, very high energies are needed to overcome the electrical repulsion between the positively charged nuclei. Even for the lightest atoms, fusion requires temperatures of tens to hundreds of millions of degrees celsius. Table 1 shows some examples of fusion reactions and ignition temperatures. The symbols

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

D and T stand for deuterium and tritium, forms of hydrogen that differ from ordinary hydrogen (H) by having one and two neutrons respectively in the nucleus in addition to the proton. The proton-proton reaction, which is the basic energy-producing process in the sun and most stars, requires the high temperatures and pressures found in the core of the sun.

Table 1

Examples of Fusion Reactions

Reaction	Energy Per Gram of Reactants (joules)	Ignition Temperature (millions °C)
$D + T \rightarrow {}^4He + n$	34×10^{10}	45
$D + D \rightarrow T + p$	10×10^{10}	650
$D + D \rightarrow {}^3He + n$	8×10^{10}	900
$D + {}^3He \rightarrow {}^4He + p$	36×10^{10}	220

For the foreseeable future, only the deuterium-tritium reaction seems attainable and is the fusion goal being pursued worldwide. Only a small part of the deuterium and tritium mass is converted to energy; nevertheless, the amount of energy generated is immense. One gram of mixed fusion fuel is equivalent to almost 100,000 kilowatt-hours of electricity or 60 barrels of oil.

The ignition temperatures in Table 1 are the minimum under which a self-sustaining fusion reaction could be ignited in an ideal system. In reality, because of energy losses, temperatures of 200 to 300 million degrees will probably be required in practical fusion reactors. Although these temperatures may seem almost beyond comprehension, they are already being routinely achieved in fusion experiments.

Temperatures of hundreds of millions of degrees are far beyond the realm of material containers. How, then, can the intensely hot reactants be contained or "confined" long enough and at sufficient density for fusion to occur? There are currently two basic approaches to fusion: magnetic confinement fusion (MCF) and inertial confinement fusion (ICF). Gravitational confinement, which makes possible the sun's nuclear reactions, is not possible on earth.

RECYCLED / RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHEQUE DU PARLEMENT

Magnetic confinement depends on the special properties of a form of matter called a plasma. At a sufficiently high temperature, electrons are separated from the atoms of gas resulting in a state consisting of negatively charged electrons and positively charged ions. This state is called a plasma and is often referred to as the fourth state of matter after solid, liquid and gas. Although plasmas may seem exotic, they are quite commonly encountered in the form of lightning flashes and neon lights. The properties of a plasma differ in some fundamental ways from those of a gas. Unlike the neutral particles of a gas, the charged particles of a plasma interact with a magnetic field and can be trapped by an appropriately shaped magnetic field. Magnetic trapping is fundamental to magnetic confinement fusion machines. Also, unlike a gas, a plasma is a good electrical conductor. This property too is important in the design of fusion machines.

The inertial confinement approach is quite different. It depends on the rapid implosion and heating of a tiny pellet of fuel, only few millimetres in diameter, using laser or particle beams. The energy focused by the beams on the surface of the pellet causes intense heating and blasts the surface away almost instantaneously. This creates a shockwave which compresses the pellet into a high-density, high-temperature plasma, where fusion occurs almost instantaneously, almost like a miniature hydrogen bomb.

One of the biggest challenges of ICF is to make efficient use of the beam energy to implode the pellet. In the case of laser beams, this depends on a number of factors including the wavelength of the laser light and the intensity of the laser beam. Another major challenge is to develop lasers or particle beam generators with sufficient power and efficiency to make ICF practical. Work on the ICF approach was begun in the U.S. in the early 1970s and significant advances were made in the 1980s but, at present, MCF is more advanced.

Although a limited amount of work is being done in Canada on ICF, the Canadian fusion program is concentrated on magnetic confinement; the rest of this review will focus on this approach.

RECYCLED / RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

TECHNOLOGY

A. Confinement

A number of magnetic field configurations can be used to trap the plasma, of which the most successful by far to date is the "tokamak," which confines the plasma in a ring, or "torus" by means of a suitably shaped magnetic field. The concept was conceived in the U.S.S.R. in the 1950s and the name tokamak is derived from the Russian words for toroidal magnetic chamber. The field must keep the plasma away from the walls of the chamber, not only, as mentioned earlier, because the temperature would destroy the walls, but also because the plasma would lose too much heat to sustain the high temperatures required. A more subtle reason is that impurities from the chamber wall would degrade the plasma.

B. Heating

The plasma can be heated in several ways. Inductive heating, in which the plasma loop acts as the secondary circuit of a transformer, can be used to reach temperatures of 10 to 50 million degrees. Higher temperatures of up to 300 million degrees can be achieved by auxiliary heating with radio-frequency energy or the injection of very high speed beams of electrically neutral hydrogen or deuterium.

Overall performance can be measured in terms of a factor Q, which is the ratio between the fusion energy produced and the external energy used to confine and heat the plasma. When the input and output energy are equal, Q has a value of 1. This state, referred to as "breakeven," is the benchmark for a feasible fusion reaction. To obtain ignition, in which the temperature of the plasma is sustained by heat from the fusion reaction itself rather than by external heating, requires a Q value of around 5 to 10.

Eighty percent of the energy of the fusion reaction is in the form of energetic neutrons which, being electrically neutral, escape from the magnetic field of the reactor. In a working reactor, they would be captured by a lithium blanket, where they would give up their energy to a heat exchanger. This heat would then be used to generate electricity by conventional technology such as a steam turbine.

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

C. Fuel

The first generation of fusion reactors will burn a fuel mixture of deuterium and tritium. Deuterium is a non-radioactive, naturally occurring isotope of hydrogen which has an abundance of 0.015% of natural hydrogen. As one cubic metre of water contains 33 grams of deuterium and the earth's oceans contain 1.5 billion cubic kilometres of water, the supply of deuterium is virtually inexhaustible. Canada is already a world leader in deuterium extraction technology since deuterium, in the form of heavy water, is an essential component of the Candu nuclear power system.

Tritium does not occur naturally, however. It is radioactive and has a half-life of only 12 years. After an initial start-up charge of tritium, a reactor would have to generate its own. Fortunately, the neutrons captured in the lithium blanket react with the lithium nuclei to produce or "breed" tritium by the reactions:

$$^{6}Li + n \rightarrow {}^{4}He + T$$

$$^{7}Li + n \rightarrow {}^{4}He + T + n$$

Known world lithium deposits are 10 million tonnes, enough to support a deuterium-tritium fuel cycle for several hundred years at a conservative estimate.

Canada also has advanced tritium-handling technology. In fact, the Tritium Removal Facility at Ontario Hydro's Darlington Nuclear Generating Station is the world's largest civilian source of tritium.

Canadian consumption of electrical power in 1988 was 482 terrawatt-hours. This amount of power could be supplied by a total of only 2 tonnes of deuterium and 3 tonnes of tritium bred from 33 tonnes of lithium. About 60 million tonnes of coal or almost 300 million barrels of oil would be required to produce the same amount of electricity.

D. Safety and Environmental Impact

Fusion reactors potentially offer two major safety advantages over conventional nuclear power plants. Perhaps the most important of these is that fusion reactors present no possibility of a

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

meltdown or a catastrophic explosion like that at Chernobyl; there is simply not enough fuel or stored energy in the reactor at any one time to cause such an accident. The other advantage is that, because the reaction is so difficult to initiate and maintain, it is essentially failsafe. Any system failure, such as a leak in the reaction chamber or a disruption of the magnet power supply, would immediately shut down the fusion reaction.

Unlike conventional nuclear power, which generates radioactive waste in the form of long-lived fission products, the by-product of fusion is helium, which is completely inert. Fusion power is not without some inherent risks, however. There will be some atmospheric release of radiation from an operating plant, mainly in the form of tritium from fuel-handling operations. Even here, there is a significant advantage over conventional nuclear power, however, since tritium is relatively short-lived with a half-life of 12.3 years. It is estimated that fusion plants will emit about 1% or less of the radioactive emissions from a comparable fission plant. Incidentally, coal-fired power plants emit amounts of radiation comparable to those from conventional nuclear plants of similar capacity. The main radiative waste from a fusion plant will be the plant itself, which will become radioactive through neutron activation of the components. To some extent, this can be minimized through judicious choice of materials, but it is possible that the volume of radioactive waste from a fusion plant will exceed that from a conventional nuclear power plant. An important distinction, though, is that these wastes, unlike fission wastes, will be relatively short-lived.

The environmental impacts of fusion power should be small. Like conventional nuclear power plants, fusion power plants will emit neither greenhouse nor acid rain-forming gases. The fuels, deuterium and lithium, are not radioactive and are otherwise quite safe and, in view of the small quantities required, pose minimal risk of transportation accidents, whose effects in any case would be nothing in comparison to the effects of a spill from an oil tanker.

RECYCLED / RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

THE INTERNATIONAL FUSION PROGRAM

A. International Cooperation

About 30 countries are currently involved in fusion research, mainly on the magnetic confinement approach. Because of the high cost of such research, about $2 billion per year, there is extensive international cooperation, including the sharing of information, building and operating fusion machines, and conducting experiments. Worldwide, around 10,000 scientists, engineers, technical staff and others are involved in fusion programs.

The largest fusion programs are supported by Europe, the U.S., Russia and Japan. Each has a major "flagship" tokamak reactor costing about $1 billion. It was at one of these reactors, JET (the Joint European Torus) located at Culham in the U.K., where the widely reported "breakthrough" experiment of last fall was conducted. A major purpose of the "big" tokamaks is to achieve breakeven (Q=1). There are about 30 other medium-sized, advanced tokamaks doing specialized work around the world, including the Canadian Tokamak de Varennes.

B. The International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER

The next major step in fusion research will be the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), which is intended to demonstrate the feasibility of magnetic confinement fusion power. ITER, unlike previous tokamaks, will be designed to achieve ignition.

The technological and engineering demands on ITER will be extreme. It will burn a mixed fuel of deuterium and tritium and operate at a temperature of 200 million degrees. The magnetic fields that confine the plasma will be generated by superconducting coils. The intense heat and radiation will require the development of new high-temperature, erosion-resistant materials to line the chamber. Damaged internal parts, made radioactive by irradiation with neutrons, will have to be replaced regularly by advanced remote handling technology.

ITER will be a major undertaking. The cost of construction is estimated to be about $5.8 billion and another $1.5 billion will be

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

incurred in design and research and development costs. The costs will be borne by the partners, Europe, the U.S., Japan and Russia, which has assumed the place of the former Soviet Union in the project. The partners will also pool their knowledge and share in the benefits. The cost, though large, is not out of line with that of conventional nuclear power. By way of comparison, the cost of one 935 MW unit at Darlington is about $3.4 billion.

The basic design for ITER was conceived during 1988-1990 at the Conceptual Design Activities (CDA), which had its headquarters at the Max Planck Institute in Germany.

An agreement to proceed with the engineering design phase of ITER was reached in July 1991. Design centres will be located in San Diego, California; Garching, Germany; and Naka, Japan; with an ITER council in Moscow, Russia to provide general oversight. Engineering Design Activities (EDA) started in 1991 and will continue to be refined through 1996.

The final decision to build ITER will probably not be made before 1997, although the site should have been selected a year earlier. It may be difficult, for various reasons, to reach an agreement to locate ITER in the territory of one of the four principal collaborators and there is a slight possibility that another country could be chosen to be the host. In some ways, Canada might be an reasonable compromise. It could certainly provide the infrastructure and the technical support and would have little difficulty in playing host to an international community of fusion researchers. There might, however, be an expectation for the host country to make a substantial contribution to the construction costs in order to offset the benefits to the local economy. Such an obligation would be difficult for Canada to meet.

Construction of ITER should begin in 1997 and be completed in 2004. ITER will be commissioned in 2005 and should by then be producing fusion energy. Although it will produce 1,000 megawatts of fusion power, it will not produce electrical power. A prototype fusion power plant would be the next major step.

RECYCLED • RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

Participation in ITER is not limited to the "big four." Canada has been participating in ITER since 1988 through the European fusion program.

THE CANADIAN FUSION PROGRAM

By international standards, the Canadian fusion program is relatively small. At $25 million a year, it represents a little over 1% of the total world effort. The major contributors to the Canadian program are the federal government, the governments of Quebec and Ontario and Ontario Hydro and Hydro-Québec. Federal funding to the fusion program is allocated by the Panel on Energy Research and Development. The National Fusion Program (NFP), operated by AECL research, has responsibility for coordinating fusion work in Canada and manages the federal funding.

The Canadian fusion effort is concentrated in two principal programs: *le Centre canadien de fusion magnetique* (CCFM), near Montreal, and the Canadian Fusion Fuels Technology Project, near Toronto.

A. *Le centre canadien de fusion magnetique*, CCFM

CCFM, which is supported by NFP, Hydro-Québec and INRS-Energie, operates the Tokamak de Varennes, Canada's most advanced tokamak facility. The centre specializes in magnetic confinement technology and reactor materials science and employs a total staff of 90, 50 of whom are scientists and 25 technicians.

The Tokamak de Varennes was not intended to achieve fusion but to study two important aspects of fusion reactor development: plasma-wall interactions and long-pulse operation. Erosion of wall materials tends to degrade plasma performance by incorporating atoms from the wall material into the plasma. CCFM is studying advanced methods of controlling and minimizing these impurities. Conventional tokamaks can typically create second-long plasma pulses. The Tokamak de Varennes is designed to produce 30-second magnetic confinement fields. It is able to do this, in part, because of the abundant power available from the Hydro-Québec grid. In order to take advantage of the long confinement, CCFM is developing a

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

radio-frequency method of injecting power into the plasma. This will allow the Tokamak de Varennes to generate conditions closer to the steady state needed for practical fusion reactors. To put this in perspective, the duration of the two-megawatt pulse in the JET experiment was only two seconds.

B. The Canadian Fusion Fuels Technology Project, CFFTP

CFFTP is an R&D management centre which contracts out R&D work in Canada and exports expertise and engineered fusion systems to other countries. It is funded jointly by NFP, the Province of Ontario through the Premier's Technology Fund, and Ontario Hydro. It also generates revenues from the sale of technology and hardware.

CFFTP's principal research and development activities include:

- tritium handling technology;
- breeder blanket technology;
- remote (robotic) handling equipment;
- fusion reactor design, including input to ITER; and
- safety and environmental studies.

In addition, CFFTP collaborates with other fusion programs, notably ITER, the International Thermonuclear Experimental Reactor; JET, the Joint European Torus; and TFTR, the Tokamak Fusion Test Reactor in the U.S. CFFTP has already participated in the Conceptual Design Activities for ITER and will take part in the Engineering Design Activities. Another important function of CFFTP is the transfer of fusion knowledge from research and development centres to industry in order to broaden the strength of the industrial base in fusion technology.

C. University and Industry

Fusion-related research is also being carried out in universities. Eleven Canadian universities have programs in areas including magnetic and inertial confinement, advanced materials, and the

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

effects of tritium on materials. The university work is supported in part by the Natural Sciences and Engineering Research Council and in part by CCFM and CFFTP.

Canadian industry is also very much a part of the fusion program. The Tokamak de Varennes, which cost nearly $50 million to build, was designed by Canadian scientists and built by Hydro-Québec and other Canadian companies. In fact, 85% of the cost of the project was spent in Canada. For example, Canatom Inc. designed the reactor proper, while the fibre-optic control system was designed by MPB Technologies. Canatom is now bidding on reactor design projects in the U.S. and MPB is selling similar control systems to fusion laboratories in the U.S. and Europe. SPAR Aerospace, the company that built the Canadarm for the space shuttle, is now using similar technology to develop remote handling systems for fusion reactor maintenance.

THE FUTURE OF FUSION

Despite the success of the JET experiment and the universal acclamation of the fusion community, a future of inexpensive, widely available fusion energy is not assured. Even though the fuel would be relatively cheap and virtually inexhaustible, and fusion power should be environmentally benign and safe, there is little doubt that the technology would be very expensive. Thus, it is possible, even if all the scientific and engineering problems can be solved, that the complexity of the system and the material requirements might preclude fusion as an economically viable power source.

The costs of fusion research have escalated considerably during recent years to the point where no individual nation, not even the economic super powers, can afford an independent program. This has its benefits, however, in that it has brought about an almost unprecedented scale of international cooperation in "big science." Continued support for fusion research is not guaranteed. The U.S. Energy Department has cancelled plans for the Burning Plasma Experiment at Princeton, which would have cost $1.4 billion; JET is facing layoffs because of cuts to its annual

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

budget of $149 million; and the EC has yet to approve funding beyond 1993. The Canadian program, too, has been threatened by a proposed reduction of CCFM's annual budget from $14 million to $10 million. An announcement was made at the end of March 1992, however, that the budget for CCFM in 1992 would be $14.4 million.

Some sceptical observers have suggested that JET experiment was more of a publicity exercise timed to boost flagging political support than a real scientific breakthrough. To some extent, this may be true. Another reason for the timing of the experiment might have been the desire, always present in science, to be first, in this case to beat TFTR to the mark. Nevertheless, the JET experiment does appear to have been a genuine achievement. The energy produced exceeded by more than 100-fold the energy produced in previous controlled fusion experiments. More importantly perhaps, the results confirmed the predicted performance. The value of Q for the November JET experiment was 0.15 but this was achieved with only 10% tritium in the fuel mixture. Had JET used a 50/50 mixture of deuterium and tritium, Q would have been 0.46 and had the test been done with JET's best plasma, it has been estimated that Q would have been 1.14. In other words, JET appears capable of achieving breakeven.

Actual breakeven may be achieved in 1993, however, when TFTR begins deuterium-tritium experiments in which researchers hope to generate 30 megawatts of fusion power. Ignition, however, will probably not be achieved until ITER comes on stream.

Despite the progress signified by the JET experiment, there is still a very long way to go before fusion can become a practical reality. For example, there are still unanswered questions about the fundamental nature of the plasma. These questions will be answered in the first of the two operational phases of ITER, expected to last six to eight years, during which workers will attempt to achieve ignited burning plasma conditions similar to those in a working fusion reactor. The second stage will be a multi-year program focusing on the technology and engineering, including the integrated performance and alternative materials and designs. Given the number of tests needed and the time required to carry them out, it is not surprising that even a prototype fusion power reactor is still many years in the future.

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

The lessons learned from fusion research will not be limited to fusion technology and there will undoubtedly be spin-off benefits. Many aspects of high technology find applications in different fields. For example, the layer of heat resistant tiles that protect the inner surface of the torus from the plasma are similar to the tiles that protect the undersurface of the space shuttle.

If Canada is to compete in the international marketplace, it must invest in advanced science and technology. The goal of practical fusion power may still be distant, but participation in the program assures Canadian scientists and engineers of a place at the forefront of one of the most important "big science" projects of our time. Just as importantly, it will provide an opportunity for Canadian industry to compete in leading edge technologies. Can Canada afford to have a nuclear fusion program? Perhaps the question should be, can it afford not to?

RECYCLED/RECYCLÉ

Étude générale BP-291F

LA FUSION NUCLÉAIRE: SOURCE D'ÉNERGIE DE L'AVENIR?

Alan Nixon
Division des sciences et de la technologie

Avril 1992

Bibliothèque du Parlement
Library of Parliament

Service de recherche

Le Service de recherche de la Bibliothèque du Parlement travaille exclusivement pour le Parlement, effectuant des recherches et fournissant des informations aux parlementaires et aux comités du Sénat et de la Chambre des communes. Entre autres services non partisans, il assure la rédaction de rapports, de documents de travail et de bulletins d'actualité. Les attachés de recherche peuvent en outre donner des consultations dans leurs domaines de compétence.

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
En vente au Canada chez
votre libraire local
ou par la poste auprès du
Groupe Communication Canada -- Édition
Ottawa, Canada K1A OS9

N° de catalogue YM32-2/291F
ISBN 0-660-93847-2

THIS DOCUMENT IS ALSO PUBLISHED IN ENGLISH

CANADA
LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

LA FUSION NUCLÉAIRE: SOURCE D'ÉNERGIE DE L'AVENIR?

INTRODUCTION

La fusion nucléaire est l'idéal que cherche à atteindre la communauté scientifique. Des scientifiques se consacrent déjà à sa conquête depuis environ quatre décennies et on ne voit pas encore quand ils parviendront à atteindre leur objectif. La fusion nucléaire, qui a été expliquée pour la première fois par Hans Bethe à la fin des années 30, est le processus qui est à l'origine de la lumière émise par le Soleil et les étoiles. Cependant, la fusion contrôlée est extrêmement difficile à réaliser sur la Terre et même si d'importants progrès ont été faits à cet égard, on estime qu'il faudra encore au moins trois décennies avant que la production d'énergie basée sur la fusion nucléaire devienne une option économiquement rentable.

Deux événements récents ont ravivé l'intérêt du public pour la fusion nucléaire. D'une part, des scientifiques ont déclaré avoir réalisé la "fusion à froid", c.-à-d. avoir produit la fusion, bien que de façon très limitée, dans une simple cellule électrolytique. Si elle avait été fondée, et il semble maintenant certain qu'elle ne l'était pas, cette affirmation aurait révolutionné la science de la fusion. D'autre part, il a été annoncé en novembre 1991 que le Joint European Torus (JET) avait produit une impulsion de puissance de deux mégawatts d'une durée de presque deux secondes. C'était la première fois qu'une quantité importante d'énergie était produite dans un réacteur à fusion.

Pourquoi la fusion nucléaire est-elle intéressante au point que des programmes de recherche aient été subventionnés pendant si longtemps même si des résultats concrets, si jamais ils sont atteints, sont encore lointains? Par rapport à la fission, source de l'énergie nucléaire classique, la fusion est très sûre; de plus, elle présente peu de danger pour l'environnement étant donné qu'elle n'émet pas de gaz responsables des

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

pluies acides ni de gaz à effet de serre. Le combustible servant à la fusion est relativement bon marché et il existe en quantité à toute fin pratique illimitée.

Ce combustible est une forme d'hydrogène, qui est le principal constituant de l'univers et est présent sur la Terre en quantités considérables sous forme d'eau dans les océans. Les conditions de température et de pression élevées dans lesquelles la fusion se produit dans les étoiles ne peuvent pas être reproduites sur la Terre, et trouver un moyen pratique de capter, de façon contrôlée, l'énergie de l'atome d'hydrogène constitue un défi d'envergure.

PRINCIPES DE BASE

L'énergie nucléaire, aussi bien de fusion que de fission, repose sur l'énergie qui lie ensemble les particules du noyau atomique. La masse du noyau atomique est légèrement inférieure à la masse totale des protons et neutrons qui le composent. La différence est appelée "défaut de masse". La relation entre la masse et l'énergie est donnée par la fameuse équation d'Einstein: $E=mc^2$, où E représente l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière. Comme la vitesse de la lumière est très grande, soit 300 millions de mètres à la seconde, même une petite quantité de masse correspond à une énorme quantité d'énergie. Un gramme de matière converti entièrement en énergie donnerait 90 millions de millions de joules, ce qui correspond à l'énergie obtenue losqu'on brûle 15 000 barils de pétrole. La valeur maximale du défaut de masse est obtenue pour le fer, qui se situe à peu près au milieu du tableau périodique des éléments. En principe, les noyaux atomiques plus légers que le noyau de fer peuvent libérer de l'énergie en se combinant ou se fusionnant pour produire des noyaux plus lourds, alors que les noyaux atomiques plus lourds que le noyau de fer peuvent libérer de l'énergie en se divisant dans le processus appelé fission nucléaire. La fission est le processus sur lequel repose la production d'énergie nucléaire classique et qui constitue le principe de base de la bombe atomique.

Même si en théorie tous les éléments plus légers que le fer peuvent se fusionner pour libérer de l'énergie, seulement quelques-uns des

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

éléments les plus légers, soit l'hydrogène, l'hélium et le lithium, pourraient être amenées à le faire dans les conditions réalisables sur la Terre. Pour produire la fusion, il faut appliquer des énergies très élevées destinées à vaincre la répulsion électrique entre les noyaux chargés positivement. Même avec les atomes les plus légers, la fusion nécessite des températures comprises entre des dizaines et des centaines de millions de degrés Celsius. Le tableau 1 donne quelques exemples de réactions de fusion et de températures d'allumage. Les symboles D et T représentent le deutérium et le tritium, des formes d'hydrogène différentes de l'hydrogène ordinaire (H) par le fait qu'elles possèdent respectivement, outre leur proton, un et deux neutrons de plus dans leur noyau. La réaction proton-proton, qui est le processus fondamental de production d'énergie du Soleil et de la plupart des étoiles, nécessite les conditions de température et des pressions élevées qu'on retrouve au coeur du Soleil.

Tableau 1

Exemples de réactions de fusion

Réaction	Énergie par gramme de réactifs (joules)	Température d'allumage (millions °C)
$D + T - {}^4He + n$	34×10^{10}	45
$D + D - T + p$	10×10^{10}	650
$D + D - {}^3He + n$	8×10^{10}	900
$D + {}^3He - {}^4He + p$	36×10^{10}	220

Dans un avenir prévisible, seule la réaction deutérium-tritium semble réalisable et elle représente l'objectif visé en matière de fusion à l'échelle mondiale. Seulement une faible partie de la masse de deutérium et de tritium est convertie en énergie, mais la quantité d'énergie libérée est considérable. Un gramme de combustible de fusion mélangé équivaut à presque 100 000 kilowattheures d'électricité ou à 60 barils de pétrole.

Les températures d'allumage du tableau 1 sont les températures minimales auxquelles une réaction de fusion auto-entretenue

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

pourrait être déclenchée dans un système idéal. En réalité, étant données les pertes d'énergie, des températures de 200 à 300 millions de degrés seront probablement requises dans les réacteurs à fusion concrets. Même si elles semblent dépasser l'imagination, de telles températures sont déjà produites couramment dans les expériences sur la fusion.

Les températures de l'ordre des centaines de millions de degrés dépassent largement le domaine de résistance thermique des contenants matériels. Comment, alors, peut-on contenir ou "confiner" les réactifs extrêmement chauds pendant une période assez longue et à une densité assez élevée pour que la fusion se produise? Il existe actuellement deux approches fondamentales en matière de fusion: la fusion par confinement magnétique (FCM) et la fusion par confinement inertiel (FCI). Le confinement gravitationnel, qui rend possible les réactions nucléaires du Soleil, n'est pas réalisable sur la Terre.

Le confinement magnétique est fondé sur les propriétés particulières d'une forme de matière appelée plasma. À une température suffisamment élevée, des électrons sont séparés des atomes de gaz, de sorte qu'est produit un état composé d'électrons de charge négative et d'ions de charge positive. Cet état est appelé plasma, et on le désigne souvent comme le quatrième état de la matière, les trois autres étant les états solide, liquide et gazeux. Même s'ils peuvent sembler insolites, les plasmas sont très fréquemment produits dans les éclairs et dans les lampes au néon. Les propriétés d'un plasma diffèrent par certains aspects fondamentaux de celles d'un gaz. Contrairement aux particules neutres d'un gaz, les particules chargées d'un plasma réagissent avec un champ magnétique et peuvent être piégées par un champ magnétique de forme appropriée. Le piégeage magnétique est un élément fondamental des machines à fusion par confinement magnétique. De plus, contrairement à un gaz, n plasma est un bon conducteur d'électricité. Cette propriété également est importante dans la conception des machines à fusion.

L'approche basée sur le confinement inertiel est très différente. Elle repose sur l'implosion et le réchauffement rapides d'une minuscule pastille de combustible, de seulement quelques millimètres de diamètre, produite au moyen d'un faisceau laser ou d'un faisceau de

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

particules. L'énergie concentrée par le faisceau sur la surface de la pastille provoque un réchauffement intense et fait sauter la surface presque instantanément. Il se produit alors une onde de choc qui comprime la pastille en un plasma de haute densité et de température élevée, dans lequel la fusion se produit presque instantanément, un peu comme s'il s'agissait d'une bombe à hydrogène miniature.

Un des plus grands défis de la FCI est de faire une utilisation efficace de l'énergie du faisceau pour provoquer l'implosion de la pastille. Avec des faisceaux lasers, le succès dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la longueur d'onde du rayonnement laser et l'intensité du faisceau. Un autre défi important à relever est la mise au point de lasers ou de générateurs de faisceaux de particules possédant une puissance et un rendement suffisants pour permettre la réalisation de la FCI. Les travaux portant sur la FCI ont commencé aux É.-U. au début des années 70 et d'importants progrès ont été réalisés dans les années 80 mais, pour le moment, l'approche basée sur la FCM est à un stade plus avancé.

Même si certains travaux sont effectués au Canada sur la FCI, le programme canadien de fusion est axé sur le confinement magnétique. Le reste de la présente étude portera sur cette dernière approche.

TECHNOLOGIE

A. Confinement

Un certain nombre de configurations de champ magnétique peuvent être utilisées pour piéger le plasma. À ce jour, la plus efficace est de loin le "tokamak", qui confine le plasma dans un anneau, ou "tore", au moyen d'un champ magnétique de forme appropriée. Le concept a été créé en U.R.S.S. dans les années 50, et le terme tokamak est formé à partir des mots russes signifiant chambre magnétique toroïdale. Le champ doit garder le plasma à distance des parois de la chambre non seulement, comme nous l'avons mentionné plus haut, parce que la forte température les détruirait, mais aussi parce que le plasma perdrait trop de chaleur pour être capable de conserver les températures élevées requises. Une autre raison plus

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

subtile est le fait que les impuretés provenant des parois de la chambre détérioreraient le plasma.

B. Chauffage

Le plasma peut être chauffé de plusieurs façons. Le chauffage inductif, dans lequel la boucle de plasma agit comme le circuit secondaire d'un transformateur, permet d'atteindre des températures de 10 à 50 millions de degrés. Des températures plus élevées, allant jusqu'à 300 millions de degrés, peuvent être atteintes au moyen d'un mécanisme de chauffage auxiliaire avec l'énergie des radiofréquences ou l'injection de faisceaux d'hydrogène ou de deutérium électriquement neutres à très grande vitesse.

La performance globale peut être mesurée en fonction d'un facteur Q, qui désigne le rapport de l'énergie de fusion produite à l'énergie externe utilisée pour confiner et chauffer le plasma. Lorsque l'énergie à l'entrée et l'énergie à la sortie sont égales, Q a la valeur 1. Cette condition, appelée "condition d'équilibre", est le point de référence pour une réaction de fusion réalisable. Pour réaliser la condition d'allumage, dans laquelle la température du plasma est maintenue par la chaleur provenant de la réaction de fusion elle-même plutôt que par une source de chauffage externe, il faut une valeur de Q d'environ 5 à 10.

Quatre-vingt pour cent de l'énergie de la réaction de fusion est sous forme de neutrons énergétiques qui, étant électriquement neutres, s'échappent du champ magnétique du réacteur. Dans un réacteur en fonctionnement, ils seraient captés par une enveloppe de lithium, dans laquelle ils céderaient leur énergie à un échangeur de chaleur. La chaleur ainsi récupérée serait utilisée pour produire de l'électricité par une méthode classique, par exemple à l'aide d'une turbine à vapeur.

C. Combustible

La première génération de réacteurs à fusion consommera un combustible formé d'un mélange de deutérium et de tritium. Le deutérium est un isotope naturel non radioactif de l'hydrogène et il existe en abondance puisqu'il représente 0,015 p. 100 de l'hydrogène naturel. Étant

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

donné qu'un mètre cube d'eau contient 33 grammes de deutérium et que les océans de la Terre contiennent 1,5 milliard de kilomètres cubes d'eau, les réserves de deutérium sont pour ainsi dire inépuisables. Le Canada est déjà un chef de file mondial dans la technologie de l'extraction du deutérium puisque cette substance est une composante essentielle du réacteur nucléaire Candu.

Le tritium, cependant, n'existe pas à l'état naturel. C'est un corps radioactif, et sa période radioactive n'est que de 12 ans. Après avoir reçu un charge de tritium initiale de démarrage, un réacteur devrait générer son propre tritium. Heureusement, les neutrons captés par l'enveloppe de lithium réagissent avec les noyaux de lithium et produisent du tritium de "régénération" par les réactions suivantes:

$$^{6}Li + n \rightarrow {}^{4}He + T$$

$$^{7}Li + n \rightarrow {}^{4}He + T + n$$

Les réserves mondiales connues de lithium s'élèvent à 10 millions de tonnes, ce qui suffirait pour entretenir un cycle de combustible deutérium-tritium pendant plusieurs centaines d'années d'après une estimation prudente.

Le Canada possède aussi une technologie de pointe en matière de manipulation de tritium. En fait, l'installation d'extraction du tritium de la centrale nucléaire de Darlington, qui appartient à l'Ontario Hydro, est la plus grande source civile de tritium au monde.

La consommation canadienne d'électricité en 1988 s'élevait à 482 térawattheures. Cette quantité d'énergie pourrait être produite à partir de seulement deux tonnes de deutérium et trois tonnes de tritium régénérées à partir de 33 tonnes de lithium. La production de la même quantité d'énergie par les méthodes classiques nécessite environ 60 millions de tonnes de charbon ou presque 300 millions de barils de pétrole.

D. Sûreté et incidences sur l'environnement

Les réacteurs à fusion peuvent offrir deux avantages importants sur le plan de la sûreté par comparaison aux réacteurs nucléaires classiques. Le plus important est sans doute le fait que les réacteurs à fusion ne présentent pas de risque de fusion du coeur du

RECYCLED · RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

réacteur ou d'explosion catastrophique comme celle de Tchernobyl; il n'y a tout simplement pas assez de combustible ou d'énergie emmagasinée dans le réacteur à un temps donné pour qu'un tel accident puisse être provoqué. L'autre avantage est le fait que la réaction, parce qu'elle est si difficile à déclencher et à entretenir, est essentiellement de type à sécurité intégrée. Toute défaillance du réacteur, comme une fuite dans la chambre de réaction ou une perturbation de l'alimentation de l'aimant, entraînerait instantanément un arrêt de la réaction de fusion.

Contrairement au réacteur nucléaire classique, qui engendre les déchets radioactifs sous forme de produits de fission à longue période radioactive, le réacteur à fusion engendre, comme sous-produit, de l'hélium, un corps totalement inerte. La fusion nucléaire comporte toutefois certains risques inhérents. Un réacteur en marche produit dans l'atmosphère un certain degré de radioactivité, principalement sous forme de tritium provenant des opérations de manipulation du combustible. Malgré cet inconvénient, l'énergie de fusion nucléaire est encore beaucoup plus avantageuse que l'énergie nucléaire classique car le tritium a une période radioactive relativement courte de 12,3 années. On estime que les émissions radioactives produites par une centrale à fusion ne dépasseront pas environ 1 p. 100 des émissions produites par une centrale à fission de puissance comparable. En fait, les centrales alimentées au charbon émettent des quantités de rayonnement comparables aux quantités émises par les centrales nucléaires classiques de même puissance. Le principal déchet radioactif d'une centrale à fusion est la centrale elle-même, qui devient radioactive par l'activation neutronique de ses composantes. Dans une certaine mesure, ce problème peut être atténué par un choix judicieux des matériaux, mais il est possible que le volume de déchets radioactifs produits par une centrale à fusion soit supérieur au volume produit par une centrale nucléaire classique. La grande différence, toutefois, est que ces déchets, contrairement aux déchets produits par la fission, ont une période radioactive relativement courte.

Les incidences environnementales de la fusion nucléaire devraient être faibles. Comme les centrales nucléaires classiques, les centrales à fusion n'émettent pas de gaz à effet de serre ni de gaz responsables des pluies acides. Les combustibles, le deutérium et le

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

lithium, ne sont pas radioactifs, sont presque sans danger sur les autres plans et, compte tenu des faibles quantités requises, ne présentent que des risques minimaux d'accidents en cours de transport. Et même si un accident survenait, ses effets seraient négligeables par comparaison à ceux d'un déversement de pétrolier.

LE PROGRAMME INTERNATIONAL DE FUSION

A. Collaboration internationale

Environ 30 pays participent actuellement à des travaux de recherche sur la fusion, qui portent principalement sur la méthode par confinement magnétique. Comme le coût de cette recherche est très élevé, soit environ deux milliards de dollars par année, les activités de collaboration internationale sont de grande envergure et comprennent le partage des informations, la construction et l'exploitation des machines à fusion ainsi que la réalisation d'expériences. À travers le monde, environ 10 000 scientifiques, ingénieurs, techniciens et autres travailleurs participent aux programmes sur la fusion.

Les plus importants programmes sur la fusion sont financés par l'Europe, les É.-U., la Russie et le Japon. Chacun de ces pays possède un important réacteur tokamak "de prestige", dont le coût s'élève à environ un milliard de dollars. C'est à l'un de ces réacteurs, le JET (Joint European Torus), situé à Culham, au R.-U., que l'expérience "sensationnelle" dont on a grandement parlé l'automne dernier a été réalisée. Un des principaux objectifs visés avec les "gros" tokamaks est d'atteindre le point d'équilibre (Q=1). À travers le monde, il existe environ 30 autres tokamaks perfectionnés de taille moyenne dans lesquels on effectue des travaux spécialisés, y compris le tokamak canadien, situé à Varennes.

B. Le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER)

La prochaine étape importance en matière de recherche sur la fusion sera le projet du réacteur thermonucléaire expérimental

RECYCLED · RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

international (ITER), destiné à démontrer la faisabilité de la production d'énergie de fusion nucléaire par confinement magnétique. L'ITER, contrairement aux tokamaks précédents, sera conçu de façon à produire l'allumage.

Les exigences technologiques et techniques imposées à l'ITER seront extrêmement élevées. Ce réacteur utilisera un combustible formé d'un mélange de deutérium et de tritium et il fonctionnera à une température de 200 millions de degrés. Les champs magnétiques qui confinent le plasma seront créés par des bobines supraconductrices. En raison de la chaleur et des rayonnements intenses produits, il faudra mettre au point de nouveaux matériaux résistant aux températures élevées et à l'érosion pour recouvrir les parois de la chambre. Il faudra remplacer régulièrement les parties internes endommagées, rendues radioactives par l'exposition aux neutrons, en ayant recours à une technique de télé-manipulation de pointe.

Le projet ITER sera une entreprise capitale. Le coût de construction est estimé à environ 5,8 milliards de dollars. En plus, 1,5 milliard de dollars seront dépensés pour les activités de conception, de recherche et de développement. Les coûts seront défrayés par les partenaires, c.-à-d. l'Europe, les É.-U., le Japon et la Russie, qui remplace l'ancienne Union soviétique dans ce projet. Les partenaires vont aussi mettre en commun leurs connaissances et partager les bénéfices. Le coût, même s'il est élevé, n'est pas disproportionné par rapport au coût associé à l'énergie nucléaire classique. À titre de comparaison, indiquons que le coût d'un réacteur de 935 MW à Darlington s'élève à environ 3,4 milliards de dollars.

Le modèle fondamental de l'ITER a été élaboré pendant la période de 1988 à 1990 dans le cadre des activités liées à l'étude de définition, qui ont été coordonnées au siège situé à l'Institut Max Planck en Allemagne.

Une entente en vertu de laquelle on pourra mettre de l'avant la phase de la conception technique de l'ITER a été conclue en juillet 1991. Des centres de conception seront situés à San Diego (Californie), Garching (Allemagne) et Naka (Japon), et un conseil de l'ITER, qui aura

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

pour fonction d'assurer la supervision générale, sera situé à Moscou (Russie). Les activités de conception technique ont commencé en 1991 et on continuera de les perfectionner jusqu'en 1996.

La décision finale relative à la construction de l'ITER ne sera probablement pas prise avant 1997, même si le choix du site devrait avoir été fait une année plus tôt. Il peut être difficile, pour diverses raisons, de s'entendre sur le choix d'un site pour la construction de l'ITER sur le territoire d'un des quatre principaux collaborateurs et la possibilité qu'on choisisse un autre pays comme hôte de l'ITER n'est pas écartée. Sur certains plans, le Canada pourrait être un compromis raisonnable. Il pourrait certainement fournir l'infrastructure et le soutien technique; de plus, il pourrait facilement recevoir une communauté internationale de chercheurs effectuant des travaux sur la fusion nucléaire. Cependant, on pourrait s'attendre à ce que le pays hôte défraie une fraction importante des coûts de construction de façon à contrebalancer les bénéfices dont jouirait l'économie locale. Il serait difficile pour le Canada de satisfaire à une telle exigence.

La construction de l'ITER devrait commencer en 1997 et être achevée en 2004. L'ITER sera mis en service en 2005 et il devrait alors produire de l'énergie de fusion. Même s'il produira 1000 mégawatts d'énergie de fusion, il ne produira pas d'énergie électrique. La construction d'un prototype de centrale de fusion serait l'étape importante suivante.

La participation au projet ITER n'est pas réservée aux "quatre grands". Le Canada y participe depuis 1988 par le biais du programme de fusion européen.

LE PROGRAMME DE FUSION CANADIEN

En fonction des normes internationales, le programme de fusion canadien est d'une envergure relativement petite. À raison de 25 millions de dollars par année, il représente un peu plus de 1 p. 100 des sommes affectées à ce domaine à l'échelle mondiale. Les principales contributions au programme canadien proviennent du gouvernement fédéral,

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

des gouvernements du Québec et de l'Ontario ainsi que d'Ontario Hydro et d'Hydro-Québec. L'aide financière du gouvernement fédéral au programme de fusion est accordée par le Comité interministériel de la recherche et du développement énergétiques. Le programme national de fusion (PNF), géré par EACL Recherche, est chargé de coordonner les travaux sur la fusion au Canada et il administre l'aide financière fournie par le gouvernement fédéral.

Les activités canadiennes en matière de fusion sont concentrées dans deux programmes principaux: le Centre canadien de fusion magnétique (CCFM), près de Montréal, et le Programme technique canadien des combustibles de fusion, près de Toronto.

A. Le centre canadien de fusion magnétique (CCFM)

Le CCFM, qui reçoit un soutien du PNF, d'Hydro-Québec et de l'INRS-Énergie, exploite le tokamak de Varennes, la plus perfectionnée des installations du genre au Canada. Il se spécialise dans la technologie du confinement magnétique et dans la science des matériaux pour réacteurs. Il compte au total 90 employés, dont 50 sont des scientifiques et 25, des techniciens.

Le tokamak de Varennes n'a pas été construit dans le but de produire la fusion nucléaire, mais dans celui d'étudier deux aspects importants de la mise au point des réacteurs à fusion: les interactions paroi-plasma et le fonctionnement en condition d'impulsion longue. L'érosion des matériaux constituant la paroi a tendance à réduire la qualité du plasma en y introduisant des atomes provenant de ces matériaux. Le CCFM effectue présentement des études portant sur des méthodes perfectionnées visant à réduire les quantités de ces impuretés. Les tokamaks classiques peuvent généralement produire des impulsions de plasma ayant une durée de vie d'une seconde. Le tokamak de Varennes est conçu pour produire des champs de confinement magnétique de 30 secondes. Il y parvient grâce, en partie, à la quantité abondante d'énergie disponible sur le réseau d'Hydro-Québec. Afin de tirer profit du long confinement, le CCFM met présentement au point une méthode d'injection d'énergie dans le plasma basée sur l'utilisation de radiofréquences. Cette façon de procéder permettra au tokamak de Varennes de créer des conditions qui se rapprochent

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

davantage du régime permanent requis dans les réacteurs à fusion concrets. À titre de comparaison, indiquons que la durée de l'impulsion de deux mégawatts produite dans l'expérience du JET n'était que de deux secondes.

B. Le Programme technique canadien des combustibles de fusion (PTCCF)

Le PTCCF est un centre de gestion de R-D qui accorde des contrats pour des travaux de R-D au Canada et qui exporte vers d'autres pays l'expertise canadienne en matière de fusion ainsi que des systèmes de fusion technologiques. Il est subventionné conjointement par le PNF, la province de l'Ontario, par le biais du Fonds de la technologie du premier ministre, et par l'Ontario Hydro. Il génère aussi des revenus par la vente de la technologie et la vente de matériel.

Les principales activités de recherche et développement du PTCCF portent notamment sur:

- la technologie de manipulation du tritium;
- la technologie des enveloppes de régénération;
- le matériel de télémanipulation (robotique);
- la conception de réacteurs à fusion, y compris l'apport à l'ITER; et
- les études relatives à la sûreté et à l'environnement.

En outre, le PTCC collabore avec d'autres programmes de fusion, notamment l'ITER (réacteur thermonucléaire expérimental international), le JET (Joint European Torus) et le TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, aux É.-U.). Il a déjà participé aux activités d'étude de définition de l'ITER et il participera aux activités de conception technique. Une autre fonction importante du PTCCF est le transfert des connaissances sur la fusion des centres de recherche et développement à l'industrie dans le but de consolider la base de l'industrie en matière de technologie de la fusion.

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

C. Universités et industrie

De la recherche sur la fusion est aussi effectuée dans les universités. Onze universités canadiennes ont des programmes qui portent notamment sur le confinement magnétique et le confinement inertiel, les matériaux nouveaux et les effets du tritium sur les matériaux. Les travaux effectués dans les universités sont subventionnés en partie par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie et en partie par le CCFM et le PTCCF.

L'industrie canadienne occupe aussi une place très importante dans le programme de fusion. Le tokamak de Varennes, dont la construction a coûté près de 50 millions de dollars, a été conçu par des scientifiques canadiens et construit par Hydro-Québec et d'autres sociétés canadiennes. En fait, 85 p. 100 des dépenses reliées au projet ont été faites au Canada. À titre d'exemple, indiquons que la société Canatom Inc. a conçu le réacteur lui-même, alors que les Technologies MPB Inc. ont conçu le système de commande à fibres optiques. La Canatom fait maintenant des soumissions pour des projets de conception de réacteurs aux É.-U., et la MPB vend des systèmes de commande similaires à des laboratoires de fusion aux É.-U. et en Europe. Spar Aérospatiale, la société qui a construit le bras canadien (Canadarm) pour la navette spatiale, utilise maintenant une technologie similaire pour mettre au point des systèmes de télémanipulation destinés à l'entretien des réacteurs de fusion.

L'AVENIR DE LA FUSION NUCLÉAIRE

En dépit du succès connu avec l'expérience du JET et de l'acclamation universelle de la part de la communauté de la fusion, il n'est pas garanti que l'énergie de fusion constituera dans l'avenir une source d'énergie bon marché et largement disponible. Le combustible serait relativement bon marché et à toute fin pratique inépuisable, et l'énergie de fusion serait sans danger et peu nocive pour l'environnement, mais il est à peu près certain que la technologie serait très coûteuse. Il est donc possible, même si on parvient à résoudre tous les problèmes

RECYCLED / RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

scientifiques et techniques, qu'en raison de la complexité du système et des exigences relatives aux matériaux, la fusion ne puisse être retenue comme une source d'énergie rentable.

Les coûts de la recherche sur la fusion ont augmenté considérablement au cours des dernières années, au point qu'aucune nation, même parmi les superpuissances économiques, ne peut à elle seule financer un programme indépendant. Cette situation présente toutefois certains avantages puisqu'elle a donné lieu à un niveau de collaboration internationale en "mégascience" qui n'a presque jamais été égalé. Il n'est pas garanti que l'aide à la recherche sur la fusion sera maintenue. Le département de l'Énergie des États-Unis a annulé les plans relatifs à une expérience sur un plasma en combustion (Burning Plasma Experiment) à Princeton, dont le coût se serait élevé à 1,4 milliard de dollars; des mises à pied risquent d'être faites dans le projet du JET en raison des coupures effectuées dans son budget annuel de 149 millions de dollars; et la CE n'a pas encore approuvé de plan de financement au-delà de 1993. Le programme canadien est également menacé par une coupure proposée du budget annuel du CCFM, qui passerait de 14 à 10 millions de dollars. Il a cependant été annoncé à la fin de mars 1992 que le budget du CCFM en 1992 s'établirait à 14,4 millions de dollars.

Certains observateurs sceptiques ont laissé entendre que l'expérience du JET était plus un exercice de publicité orchestré en vue de stimuler le soutien politique fléchissant qu'une véritable percée scientifique. Dans une certaine mesure, il se peut qu'ils aient raison. Une autre raison qui explique peut-être l'annonce est le désir, toujours présent en sciences, d'être le premier, c'est-à-dire, dans ce cas, de devancer le TFTR. Néanmoins, l'expérience du JET semble assurément avoir été une réalisation originale. L'énergie produite était plus de 100 fois supérieure à l'énergie produite dans des expériences antérieures de fusion contrôlée. En outre, et ce facteur importe peut-être davantage, les résultats ont confirmé la performance prévue. La valeur de Q pour l'expérience du JET effectuée en novembre était de 0,15 mais elle a été obtenue avec un mélange combustible ne contenant que 10 p. cent de tritium. Si le JET avait utilisé un mélange de deutérium-tritium de 50-50,

RECYCLED · RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

la valeur de Q aurait été de 0,46, et s'il avait procédé à l'essai avec son meilleur plasma, elle aurait, selon les estimations, été de 1,14. En d'autres termes, le JET semble capable d'atteindre le point d'équilibre.

Le point d'équilibre pourrait être atteint en 1993, lorsqu'on commencera sur le TFTR les expériences avec le mélange deutérium-tritium au cours desquelles les chercheurs espèrent produire 30 mégawatts d'énergie de fusion. L'allumage, cependant, ne sera probablement pas effectué avant la mise en opération de l'ITER.

Malgré le progrès que représente l'expérience du JET, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir avant que la fusion nucléaire devienne une réalité concrète. Par exemple, certaines questions concernant la nature fondamentale du plasma restent encore sans réponse. Des réponses seront apportées dans la première des deux phases d'exploitation de l'ITER, d'une durée prévue de six à huit ans, au cours de laquelle les travailleurs tenteront de produire des conditions de plasma en combustion allumé semblables aux conditions qui existent dans un réacteur à fusion en fonctionnement. La seconde phase sera un programme de plusieurs années axé sur la technologie et l'étude technique, notamment sur la performance intégrée et les matériaux et modèles de rechange. Compte tenu du nombre d'essais requis et du temps nécessaire pour les effectuer, il n'est pas étonnant de constater que même un prototype de réacteur à fusion ne pourra devenir réalité avant un grand nombre d'années.

Les leçons tirées de la recherche sur la fusion ne se limiteront pas à la technologie de la fusion et elles auront hors de tout doute des retombées avantageuses. De nombreux aspects de la haute technologie trouvent des applications dans différents domaines. Par exemple, les carreaux réfractaires qui protègent contre le plasma la surface intérieure du tore sont semblables aux carreaux qui protègent la surface inférieure de la navette spatiale.

S'il veut être compétitif sur le marché international, le Canada doit investir dans les sciences et techniques de pointe. L'objectif visé en matière d'énergie de fusion peut être encore éloigné, mais la participation au programme assure aux scientifiques et ingénieurs canadiens

RECYCLED/RECYCLÉ

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

un rôle d'avant-garde dans un des plus importants projets de "mégascience" de notre époque. Elle permettra aussi à l'industrie canadienne d'être compétitive dans les technologies de pointe, et cet aspect est aussi important que le premier. Le Canada peut-il se permettre d'avoir un programme de fusion nucléaire? On devrait peut-être plutôt se demander s'il peut se permettre de ne pas en avoir un!

RECYCLED/RECYCLÉ